



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2018

Permafrost in den Alpen: Erscheinungsformen, Verbreitung und zukünftige Entwicklung

Krautblatter, Michael ; Kellerer-Pirklbauer, Andreas ; Gärtner-Roer, Isabelle

Abstract: Während die Erforschung der Vergletscherung der Alpen und anderer Gebirge auf eine mehr als 150jährige Geschichte zurückblickt, rückte der Permafrost als verborgene Vereisung im Innern von Böden, Schuttmassen und Felsen der Gebirge erst seit den ausgehenden 1970er-Jahren verstärkt in den Fokus und wurde wissenschaftlich dokumentiert. Für die Veränderungen von Permafrost im Hochgebirge gibt es bis auf wenige Ausnahmen erst seit den 1980er-Jahren verlässliche Messreihen, was die Analyse der Auswirkungen des Klimawandels heute erheblich erschwert. Nach Einschätzungen mehrerer Studien gehören die Permafrostveränderungen im Zuge des Klimawandels in den Hochgebirgen aktuell zu den wichtigsten Einflussfaktoren für alpine Naturgefahren.

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-170231>

Journal Article

Published Version

Originally published at:

Krautblatter, Michael; Kellerer-Pirklbauer, Andreas; Gärtner-Roer, Isabelle (2018). Permafrost in den Alpen: Erscheinungsformen, Verbreitung und zukünftige Entwicklung. *Geographische Rundschau*, (11):22-29.

Michael Krautblatter, Andreas Kellerer-Pirklbauer, Isabelle Gärtner-Roer

Permafrost in den Alpen

Erscheinungsformen, Verbreitung und zukünftige Entwicklung

Während die Erforschung der Vergletscherung der Alpen und anderer Gebirge auf eine mehr als 150jährige Geschichte zurückblickt, rückte der Permafrost als verborgene Vereisung im Innern von Böden, Schuttmassen und Felsen der Gebirge erst seit den ausgehenden 1970er-Jahren verstärkt in den Fokus und wurde wissenschaftlich dokumentiert. Für die Veränderungen von Permafrost im Hochgebirge gibt es bis auf wenige Ausnahmen erst seit den 1980er-Jahren verlässliche Messreihen, was die Analyse der Auswirkungen des Klimawandels heute erheblich erschwert. Nach Einschätzungen mehrerer Studien gehören die Permafrostveränderungen im Zuge des Klimawandels in den Hochgebirgen aktuell zu den wichtigsten Einflussfaktoren für alpine Naturgefahren.

Permafrost ist rein thermisch dadurch definiert, dass Fels, Lockermaterial oder Boden für zwei aufeinanderfolgende Jahre unter 0°C bleiben, unabhängig vom Wassergehalt des Materials (NRC-Permafrost-Subcommittee 1988). Diese Definition fällt oft nicht mit dem tatsächlichen Gefrierpunkt zusammen, da z. B. Gesteinsdruck, gelöste Ionen im Porenwasser und die Krümmung von kleinen Porenräumen den Gefrierpunkt verändern. Viele Gesteine der Alpen gefrieren erst unter dem Datumsgefrierpunkt (0°C) bei einem Gleichgewichtsgefrierpunkt von $-0,1$ bis $-1,5^{\circ}\text{C}$.

Auch unterhalb des Gleichgewichtsgefrierpunkts gibt es noch flüssiges Wasser, das erst beim Erreichen eines noch tieferen spontanen Gefrierpunkts friert, diesen Umstand bezeichnet man als „Supercooling“ (unterkühltes Wasser), das zu hohen Druckgradienten innerhalb des Gesteins führen kann.

Permafrost ist im Gegensatz zu Gletschern eine versteckte Vereisung im Innern der Berge, die dadurch in Erscheinung tritt, dass sich das thermische, hydraulische, mechanische und biotische Verhalten der gefrorenen Felsen, Lockermateria-

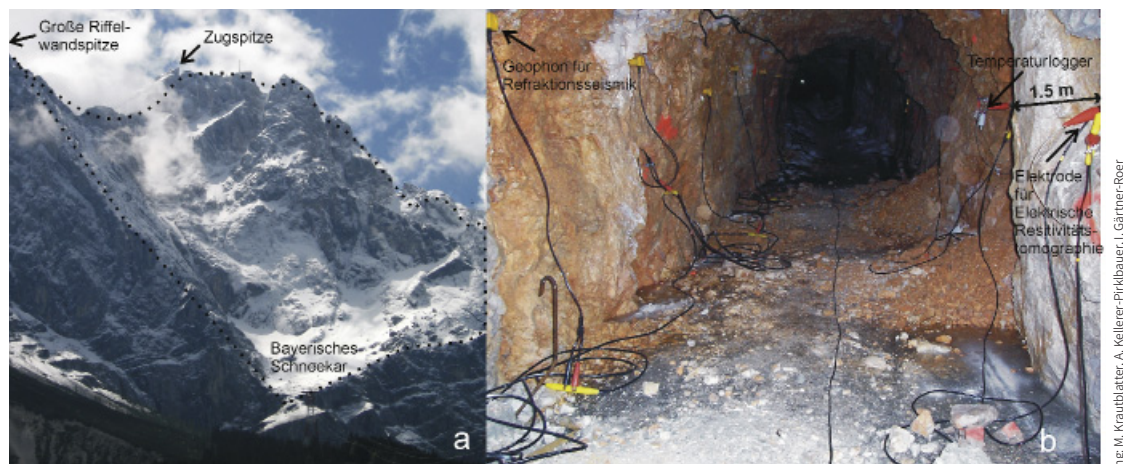
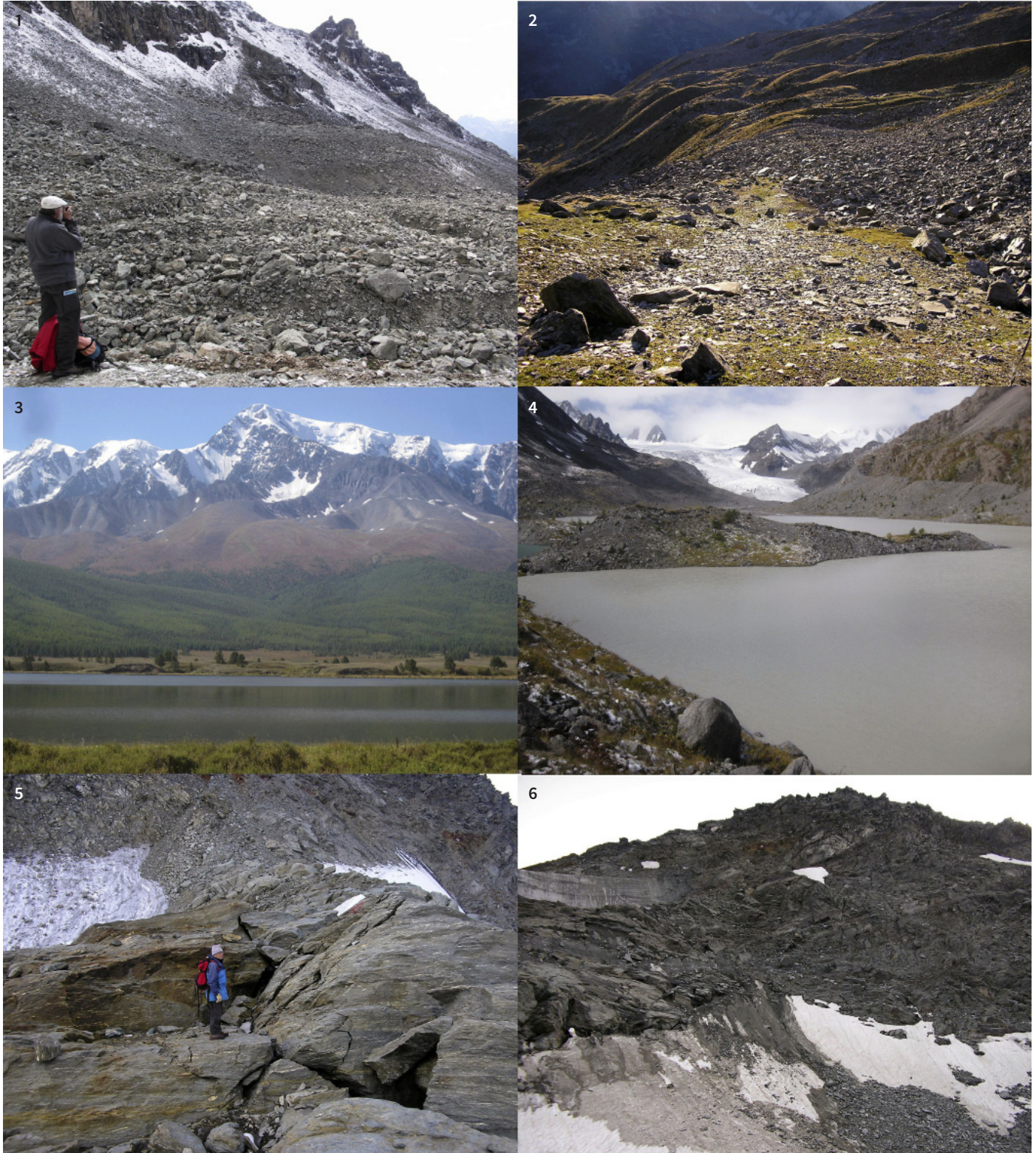


Abb. 1 a) Die Ausbruchsnische (punktuiert) des 200–300 Mio. m^3 großen Eibsee-Bergsturzes, der vor 3700–4000 Jahren z. T. aus Permafrostfelsen an der Zugspitze herabstürzte. b) Heutiges Permafrost-Testtransekt im Klammtollen an der Zugspitz-Nordwand in 2800 m Höhe, an dem mithilfe der elektrischen Resistivitätstomographie, Refraktionsseismiktomographie und Temperaturmessungen der Zustand der Permafrostfelsen überwacht wird

Fotos und Bearbeitung: M. Krautblatter, A. Kellerer-Pirklbauer, I. Gärtner-Roer

lien oder des Bodens abrupt ändert (vgl. Abb. 1b). Thermisch gesehen, erfordert der „latente“ Phasenübergang von Eis zu Wasser viel thermische Energie (entspricht in etwa der Energiemenge, die das Erhitzen der gleichen Wassermenge von 0–80 °C erfordert). Permafrostsysteme werden

durch die Gegenwart von Eis thermisch gepuffert und ihre Wärmeleitfähigkeit wird durch die Gegenwart von Eis, z. B. in Spalten, verändert. Hydraulisch verändert sich die Wasserdurchlässigkeit von eisdurchsetztem Fels, Lockermaterial oder Boden. In frierendem Felsen z. B. nimmt die



Fotos 1) Aktiver Blockgletscher (Murtèl, Schweiz) mit Kompressionsloben (Vordergrund) und steiler Stirn (Hintergrund); 2) Fossiler Blockgletscher durchbricht die Jüngere-Dryas-Moräne (Turtmanntal, Schweiz); 3) Degradierende Palsen mit sichtbarem Eiskern am Rande eines expandierenden Thermokarstsees (Altaigebirge, Sibirien); 4) Ausbruchsgefährdeter Thermokarst-See im Vorfeld des Sofiski-Gletschers (Altaigebirge, Sibirien); 5) Aktive eisgestützte Sackung in einem vor wenigen Jahrzehnten vom Gletscher freigegebenen N-S exponierten Felsgrat im Steintälli (Mattertal, Schweiz); 6) Verstärkte Sturzaktivität am Steintälli-Grat

Fotos: verändert nach Krautblätter und Hauck 2011

Wasserdurchlässigkeit in Versuchen um mehrere Größenordnungen ab und es bildet sich aufsitzendes Grundwasser, häufig mit hohen Drücken, die z. B. Felsstürze auslösen können. Mechanisch verändert sich der Zusammenhalt der gefrorenen Felsen oder Lockermaterialien, der oft durch Eis in den Zwischenräumen gegeben ist. Aber auch die Festigkeit von Fels an sich und die Belastbarkeit von Fels-Eis-Kontakten sind stark temperaturabhängig (Krautblatter et al. 2013). Stark erforscht wird derzeit auch die biotische Aktivität im Zusammenhang mit Permafrostvorkommen und der Permafrostdegradation.

Der Permafrost im Gebirge zeichnet sich durch seine hohe räumliche und zeitliche Variabilität aus. An der Oberfläche kommt es zu ständigen Veränderungen der Energiebilanz und damit des Wärmeflusses in den Untergrund hinein, die längerfristig die Degradation und Aggradation von Permafrost steuern.

deren Bau behindern, (c) durch seine klimatischen Effekte, indem lokale Kaltwindzirkulationen durch Permafrostschuttmassen unterhalten werden, und (d) durch die von ihm ausgehende besondere Gefahrensituation, indem an steilen Hängen aufgrund des Auftauens Fels- und Lockergesteinsmassen in Bewegung geraten können. Verbreitung und Auftaudynamik des Gebirgspermafrosts sind stark von lokalen topographischen, klimatischen und hydrologischen

Einflüssen und dem betroffenen Substrat abhängig. Deshalb ist die lokale Charakterisierung und Modellierung von Gebirgspermafrost und dessen Auftaudynamik ein wichtiges Forschungsanliegen. Die seit den 1980er-Jahren beobachtete Veränderung des alpinen Permafrosts zieht weitreichende Konsequenzen nach sich, in den Hochgebirgen, wie z. B. Naturgefahren, aber auch weit über die Hochgebirge hinausreichend, wie z. B. die hydrologischen Veränderungen von Flüssen, die im Gebirge entspringen. Aus diesem Kontext heraus entwickeln sich neue Forschungsfragen, -ansätze und -methoden, die einem prozessualen, physikalischen Verständnis der Permafrostentwicklung und -degradation dienen und dadurch aus den kurzen Beobachtungszeitreihen von alpinem Permafrost belastbare Ansätze für die Prognose des zukünftigen Verhaltens zu entwickeln suchen. Gerade in den Kopplungsfragen zwischen dem atmosphärischen Antrieb und der Permafrostentwicklung sowie zwischen der Permafrostentwicklung und deren Auswirkungen auf Hydrologie, Bewegungsdynamik und zukünftiger Formentwicklung liegen die zentralen Forschungsfragen der nächsten Jahre. Die Blockgletscher nehmen als die am längsten untersuchten alpinen Permafrostsysteme eine Schlüsselstellung ein, um zu verstehen, wie der Klimawandel auf Permafrostsysteme über Jahrzehnte wirkt.

Blockgletscher und Solifluktion: Indikatoren des Permafrosts im Klimawandel

Das Vorkommen von dauerhaft gefrorenem Material im Untergrund ist durch charakteristische Geländeformen, sogenannte Geoindikatoren, erkennbar. Eisübersättigtes Lockermaterial auf einem geneigten Hang fängt aufgrund der herrschenden Kräfte an zu kriechen und bildet somit

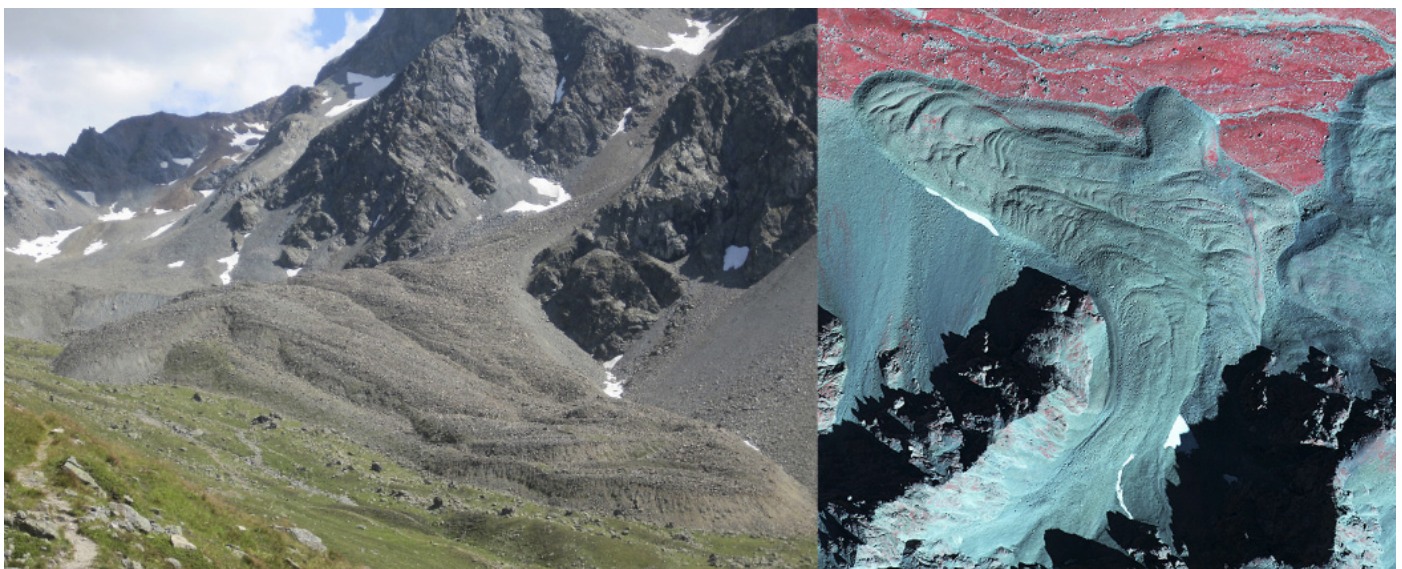


Foto links: I. Gärtner-Roer (18.8.2009), Aufnahme rechts: Airborne Digital Sensor, Swisstopo, PERMOS (August 2012)

Abb. 2: Aktiver Blockgletscher Muragl, Engadin, Schweiz. Links eine terrestrische Aufnahme mit Blick Richtung Osten, auf der sehr eindrücklich die steile Stirn zu erkennen ist. Rechts eine Luftbildaufnahme des gleichen Blockgletschers, auf der die Gräben und Wülste, typische Kriechstrukturen, sowie der Ausbruchslöb im Norden gut sichtbar sind

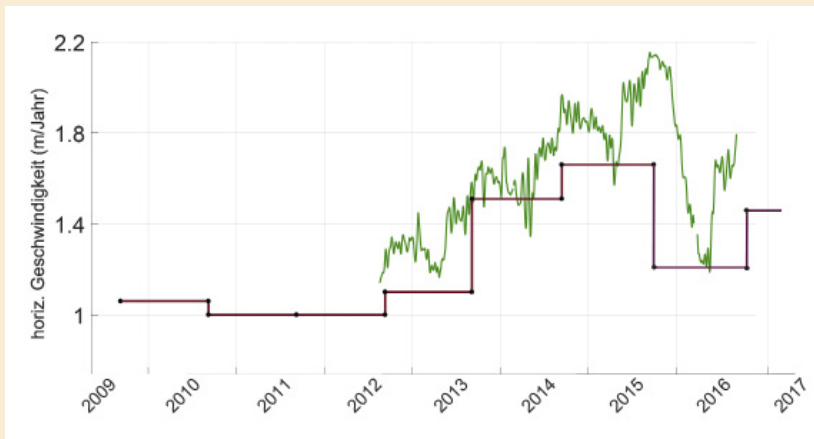


Abb. 3: Oberflächenbewegung des Blockgletschers Muragl. Die mittlere jährliche Bewegung, gemessen mit dem Tachymeter an 19 großen Blöcken an der Oberfläche (2009–17, in violett), sowie die kontinuierliche Bewegung, gemessen mit einem differenziellen GPS (Global Positioning System) an einem Punkt an der Oberfläche (2012–16, in grün).

Grafik: M. Krautblatter, A. Kellerer-Pirklbauer, I. Gärtner-Roer

übersteilte Fronten aus. Bei Bodenmaterial bilden die Gefrier- und Auftauprozesse sogenannte Solifluktuationsloben aus (Harris et al. 2008), die auch bewachsen sein können. Hierbei handelt es sich um girlandenförmige Formen, die in den Alpen Frontwülste von bis zu 1 m Höhe und Bewegungsraten von wenigen Zentimetern im Jahr haben (Kellerer-Pirklbauer 2018). Bei größerem Material (z. B. aus Moränen oder Schutthalde) können sich sogenannte Blockgletscher (vgl. Abb. 2) ausbilden (Wahrhaftig und Cox 1959, Barsch 1996). Sind sie aktiv, enthalten sie im Inneren z. T. mächtige Eiskörper und bewegen sich mit einigen Zentimetern bis Metern pro Jahr hangabwärts. Diese Bewegung ist anhand charakteristischer Oberflächenstrukturen, Wülsten und Gräben, erkennbar und an der Oberfläche messbar.

An vielen aktiven Blockgletschern wurden mit steigenden Temperaturen auch zunehmende Bewegungsgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 3) gemessen (Roer et al. 2005, Delaloye et al. 2010, PERMOS 2016). Die Bewegung ist demnach durch die Temperatur des Eises und das Vorhandensein von Wasser und Schmelzwasser im Untergrund gesteuert (Buchli et al. 2018), aber auch durch die Topographie. Während „normale“ Blockgletscher trotz der Bewegung eine stabile Form behalten, werden seit einigen Jahren auch Blockgletscher beobachtet, die an ihrer Oberfläche starke Veränderungen (z. B. tiefe Spalten oder das Ablösen ganzer Loben) und sehr hohe Bewegungsraten aufweisen (Roer et al. 2008, Bodin et al. 2016), die auf eine tief greifende Permafrostdegradation zurückzuführen ist.

Räumliche Verbreitung und Auftaudynamik von alpinem Permafrost

Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Permafrostmodellierungsergebnisse von Boeckli et al. (2011) für den westlichen Teil Österreichs sowie die angrenzenden Gebiete. Lediglich die höchsten Bereiche der Nordalpen sind von Permafrost

beeinflusst. Standorte für Permafrostmonitoring liegen in diesem Gebiet im Bereich der Zugspitze in Deutschland oder etwa am Dachstein in Österreich. Die wichtigsten Permafrostareale in Österreich liegen in den Zentralalpen von der Silvretta-Gruppe im Westen bis in die Niedere Tauern im Osten mit den Hauptgebieten Ötztaler Alpen und Hohe Tauern.

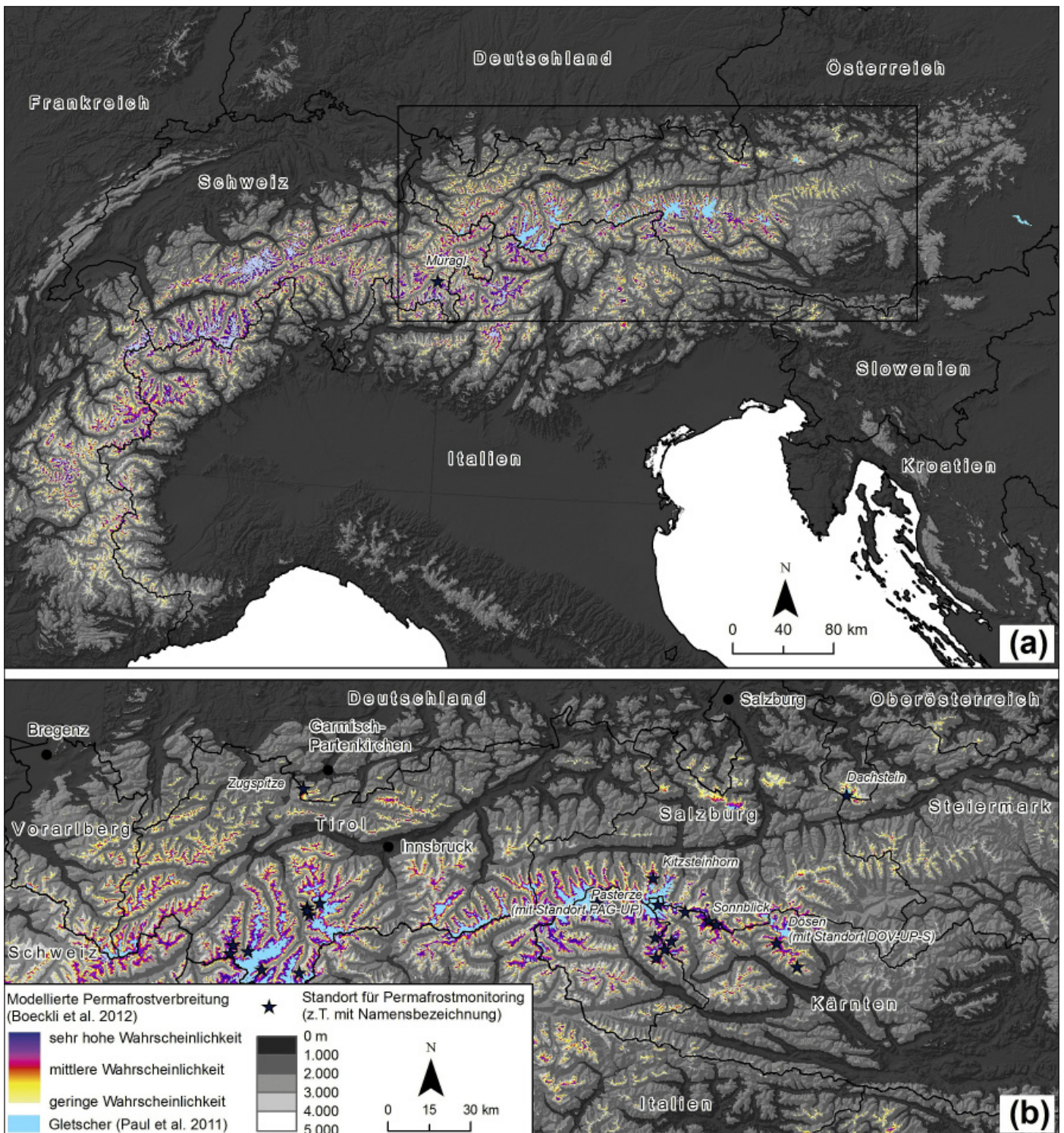
Der Permafrost im Gebirge zeichnet sich durch seine hohe räumliche und zeitliche Variabilität aus. An der Oberfläche kommt es zu ständigen Veränderungen der Energiebilanz und damit des Wärmeflusses in den Untergrund hinein, die längerfristig die Degradation und Aggradation von Permafrost steuern (vgl. Abb. 4). Der Wärmefluss an der Oberfläche wird kontrolliert durch kurz- und langwellige Ein- und Ausstrahlung, latente und fühlbare Wärmeströme und geothermale und transiente (also vorübergehende z. B. aus einer kälteren Zeit wie der kleinen Eiszeit stammende) Wärmeflüsse. Variationen in der kurzwelligen Einstrahlung aufgrund von Hangexposition, Hangneigung und Abschattung gehören zu den wichtigsten Ursachen für das heterogene Auftreten von Permafrost im Gebirge. Demnach liegt die Permafrostuntergrenze auf südseitigen steilen Felsen in den Alpen bis zu 1000 m höher als auf der Nordseite (Gruber et al. 2004). Auch jährliche Schwankungen der realen kurzwelligen Einstrahlung, z. B. aufgrund veränderter atmosphärischer Bedingungen und der reduzierten Albedo im langen Hitzesommer 2003, beeinflussen erheblich die Auftautiefe des Permafrostes. Auch die langwelligen Strahlungskomponenten und die um eine Magnitude kleineren fühlbaren und latenten Wärmeströmungen unterliegen starken saisonalen Schwankungen.

Auf lokaler Skala ist die Verbreitung von Permafrost in alpinen Gebieten wesentlich komplexer: Temporäre Schneedecken isolieren je nach Dicke und Dichte, absorbieren effizient langwellige Strahlung und reflektieren kurzwellige Strahlung und verändern dadurch nachhaltig den Wärme-

haushalt der Oberfläche. Im Zuge der Klimaerwärmung könnten die Änderungen des räumlichen und zeitlichen Auftretens der Schneedecke zu den wichtigsten Faktoren für rasche Veränderungen des Permafrostes gehören. Auch Faktoren wie z.B. die dreidimensionale Topographie der Oberflächenformen, latenter und fühlbarer Wärmeaustausch durch Wasserflüsse zwischen Gletschern und Permafrostkörpern und Jahrzehnte andauernde Anpassungseffekte durch die Veränderung von Schnee- und Gletscherflächen

beeinflussen die lokale Permafrostverbreitung nachhaltig.

Einblicke in die Verbreitung und Veränderung von Permafrost im Hochgebirge bieten vor allem direkte und indirekte thermische Messverfahren (z.B. Temperaturmessungen auf Oberflächen, unter Schnee oder in Bohrlöchern), indirekte Verfahren zur Abschätzung des Permafrostes im Untergrund (z.B. Geophysik) und thermische Modellierungsverfahren. Allein in den Alpen überwachen mehr als 1000 Temperaturlogger Ober-



flächentemperaturen von Permafrostfelsen und Permafrostkörpern im Lockergestein, eine zweistellige Anzahl von Bohrlöchern über 15 m Tiefe überwacht direkt thermische Veränderungen des Permafrosts. 14 solcher Bohrlochstandorte in der Schweiz sind zum Monitoringnetzwerk PERMOS (PERMOS 2010) zusammengefasst. Das einzige deutsche Permafrostbohrloch befindet sich an der Zugspitze (www.lfu.bayern.de). An drei Standorten wird in Österreich Permafrost in Bohrlöchern gemessen, diese sind im Bereich des Kitzsteinhorns, am Hohen Sonnblick sowie am Dachstein installiert. Neben dem Monitoring dienen die dabei gewonnenen Daten auch zum Kalibrieren und Validieren von thermischen Untergrundmodellen. Diese Modelle können inzwischen mit überwiegend physikalisch-basierten Annahmen thermische Gleichgewichtsbedingungen und Veränderungen in ein-, zwei und dreidimensionalen idealisierten Geometrien von alpinen Felswänden und Permafrost in Schuttkörpern berechnen. Allerdings werden für die Modelle etwa in Bezug auf Topographie, Einfluss des Oberflächensubstrats, Wasserflüsse, turbulente Wärmeflüsse oder Schneebedeckung naturgemäß stark vereinfachte Annahmen getroffen. Die Modelle sind daher nur bedingt von den lokalen Verhältnissen einer Region auf andere Regionen im Hochgebirge übertragbar. Daraus erwächst der Bedarf für ein umfangreiches Monitoring von Permafrost in verschiedenen geomorphologischen Formen wie Blockgletschern, Solifluktuationsloben, Schutthalde, Felswänden, Felsgraten und anderen im Hinblick auf die zeitliche und räumliche Variabilität des Permafrosts. Tiefere Einblicke in Permafrostsysteme und deren Veränderung auf verschiedenen Skalen sind essenziell, um angewandte Aspekte wie Naturgefahren besser verstehen, aber auch, um die Auswirkungen von Klimaänderungen besser antizipieren zu können.

Permafrostverbreitungskarten und Zukunftsszenarien am Beispiel Österreich

Vergletscherte Gebiete – aktuell rund 2000 km² im Alpenraum (Paul et al. 2011) – kann man relativ gut mithilfe von Fernerkundungsdaten abgrenzen, für Permafrostgebiete gilt das nicht. Für die räumliche Abgrenzung von Permafrost muss primär auf numerische Modelle zurückgegriffen werden. Für unterschiedliche Regionen des Alpenbogens gibt es unterschiedliche Permafrostmodelle, die von ihrer Komplexität z. T. sehr stark variieren. Eine für den gesamten Alpenbogen einheitliche Modellierung der Permafrostverbreitung wurde bisher nur einmal durchgeführt (Boeckli et al. 2011). Die Modellierung war das Ergebnis des von der EU finanzierten internationalen Projektes „PermaNET – Permafrost Long-term Monitoring Network“. Eine der wesentlichsten Grundlagen für die Modellierung bestand aus der Sammlung von verschiedenen permafrostbezogenen Hinweisen aus Geländebefunden – wie etwa die zuvor bereits genannten Blockgletscher – und Monitoringaktivitäten im gesamten Alpenraum (Cremonese et al. 2011). Die erklärenden Variablen zum statistischen Modell zur Permafrostverbreitung waren darin die Jahresmitteltemperatur, die potenzielle Sonneneinstrahlung und der mittlere Jahresniederschlag. Als Ergebnis wurde die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von Permafrost in Form eines Indexwertes für jede Gitterzelle (30 x 30 m) abgeschätzt. Abhängig vom gewählten Indexschwellenwert kann davon ausgegangen werden, dass zwischen 2000 km² und rund 12000 km² des Alpenraumes von Permafrost beeinflusst sind. Als plausibler Mittelwert der Abschätzung kann der Indexwert von 0,5 angenommen werden, was rund 6200 km² der Alpen als Permafrostareale ausweist. Somit sind Permafrostgebiete flächenmäßig rund dreimal so

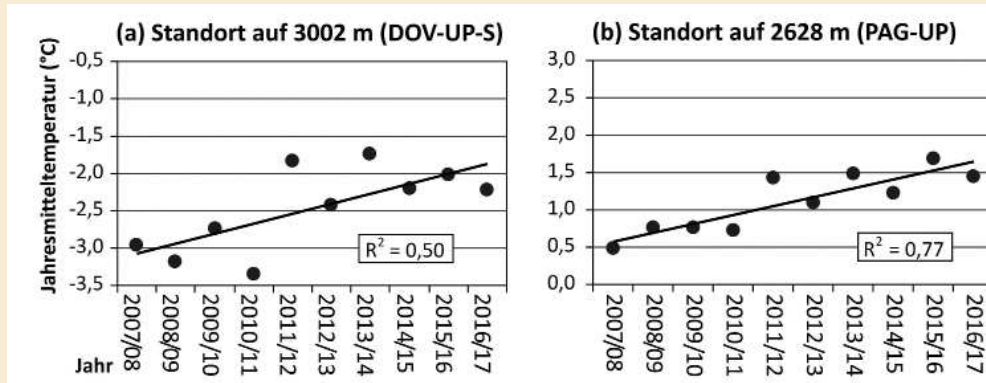


Abb. 5: Langfristige Entwicklung: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an zwei ausgewählten Standorten für Permafrostmonitoring in Österreich (Standort DOV-UP-S auf 3002 m im Bereich der Dösen im Bundesland Kärnten und Standort PAG-UP auf 2628 m im Bereich der Pasterze, dem größten Gletscher Österreichs) für die zehnjährige Messperiode 2007/08 bis 2016/17

■ Textbox

Wichtige Fakten zum alpinen Permafrost

- Permafrost bezeichnet dauerhafte Temperaturen unter 0 °C, die das thermische, hydraulische, mechanische und biologische Verhalten von Fels, Lockermaterial oder Boden deutlich verändern.
- Visuell erkennbar ist das Vorkommen von Permafrost durch geomorphologische Oberflächenformen wie Blockgletscher und Solifluktuationsloben, die mit ihren charakteristischen Formen das langsame Kriechen des dauerhaft gefrorenen, oft eisreichen Untergrunds anzeigen.
- Permafrostareale in den Alpen sind vermutlich flächenmäßig rund dreimal größer (~6 200 km²) als vergletscherte Gebiete (~2 000 km²).
- Alpine Permafrostmessungen in den letzten 20 Jahren belegen eine deutliche Erwärmung des Permafrosts und dessen Degradierung.
- Die Auswirkungen werden z. B. in vermehrten Felsstürzen und Steinschlägen, in kriechenden Hangpartien, die die Infrastruktur gefährden können und in veränderter Wasserführung deutlich.
- Verbesserte Monitoring- und Modellierungsmethoden tragen dazu bei, die räumliche und zeitliche prozessuale Dimension der Veränderung besser zu verstehen und die zukünftige Entwicklung zu antizipieren.

groß wie vergletscherte Gebiete. 35% der Permafrostareale im gesamten Alpenraum befinden sich in der Schweiz, gefolgt von Italien (28,7%), Österreich (25,0%), Frankreich (11,3%) sowie Deutschland und Slowenien (je 0,1%).

Kontinuierliches Monitoring von Permafrost in Österreich gibt es erst seit der Mitte des letzten Jahrzehntes, wobei gegenwärtig drei Standorte mit Bohrlöchern im Permafrost eingerichtet sind, am Hohen Sonnblick seit 2005/06, am Kitzsteinhorn seit 2010/11 und im Dachsteingebiet seit 2014 (vgl. Abb. 4). Daneben gibt es rund 20 weitere Standorte für indirektes Permafrostmonitoring in Österreich (Kaufmann und Kellerer-Pirklbauer 2015). In den Ötztaler Alpen, den Stubai Alpen, dem Dachsteingebiet sowie in den Hohen und Niederen Tauern (vgl. Abb. 4) reichen die geschlossenen Datenreihen von Bodentemperaturen bis in die Mitte des letzten Jahrzehntes zurück. Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur von zwei Monitoringstandorten an der Bodenoberfläche: Standort DOV-UP-S auf 3 002 m im Bereich der Dösen im Bundesland Kärnten im Permafrost und Standort PAG-UP auf 2 628 m im Bereich der Pasterze, dem größten Gletscher Österreichs, im Bereich des saisonalen Frostes im Zeitraum 2007–17. An beiden Standorten ist ein allgemeiner Erwärmungstrend von rund 1 K pro zehn Jahre erkennbar, wenn auch mit starken interannualen Schwankungen.

Welche Auswirkungen sind zu erwarten?

Zu den wichtigsten bereits beobachtbaren Änderungen gehört die Destabilisierung von Hangbereichen, in denen der Permafrost degradiert, d. h. sich erwärmt oder auftaut. In steilen Felsbereichen kommt es vor allem im unteren Permafrosthöhenbereich um 3 000 m, der nahe an der Auftautemperatur ist, zu Steinschlägen und Felsstürzen (Ravanel et al. 2010, Ravanel und Deline 2011, Kellerer-Pirklbauer et al. 2012, Magnin et al. 2015). Inzwischen sind auch einige größere Sturzereignisse aufgetreten, bei denen Fels-Eis-Lawinen schnell und weit ins Tal vorgedrungen sind, im Fall des Kolka-Karmadon 2002 im russischen Kaukasus mit ca. 140 Toten (Huggel 2009, Pudasaini und Krautblatter 2014). Blockgletscher, die aus Felsblöcken mit Eismatrix bestehen beschleunigen sich in vielen Bereichen der Alpen bis zu mehreren Metern pro Jahr und auch darüber hinaus und führen z. T. zu gefährlichen Blockstürzen an den steilen Blockgletscherfronten (Roer et al. 2005). In Einzelfällen kann Permafrostdegradation auch zu Ausbruchsfluten führen, wenn Permafrost in natürlichen Dämmen degradiert. Insgesamt bedeutender sind vermutlich langsame Kriechbewegungen in degradierendem Permafrost, die zu Problemen in alpiner Infrastruktur führen. Betroffen sind vor allem Seilbahnen und Lifte und die angegliederte touristische Infrastruktur, aber auch Sicherheitsbauten wie Lawinenverbauungen (Phillips und Schweizer 2007). Die Investitionen in diesen Bereichen sind oft erheblich, da flexible Fundamente, aktive oder passive Kühlungssysteme und häufig komplette Um-, Rück- oder Neubauten erforderlich werden. Erste erfolgreiche Konzeptionen wurden in einer Schweizer Richtlinie festgehalten (Bommer et al. 2010).

LITERATUR

- Barsch, D. (1996) Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments. Berlin
- Bodin, X., Krysiński, J.-M., Schoeneich, P., Le Roux, O., Lorier, L., Echelard, T., Peyron, M. und A. Walpersdorf (2016): The 2006 collapse of the Bérard Rock Glacier (Southern French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes* 28 (1), S. 209–223
- Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S. und J. Noetzli (2011): A statistical permafrost distribution model for the European Alps. *The Cryosphere Discussions* 5, S. 1419–1459
- Bommer, C., Phillips, M. und L. U. Arenson (2010): Practical recommendations for planning, constructing and maintaining infrastructure in mountain permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes* 21, S. 97–104
- Buchli, T., Kos, A., Limpach, P., Merz, K., Zhou, X. und S. M. Springman (2018): Kinematic investigations on the Furggwanhorn Rock Glacier, Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes* 29, S. 3–20
- Cremonese, E., Gruber, S., Phillips, M., Pogliotti, P., Boeckli, L., Noetzli, J., Suter, C., Bodin, X., Crepaz, A., Kellerer-Pirklbauer, A., Lang, K., Letey, S., Mair, V., Morra di Cella, U., Ravanel, L., Scapozza, C., Seppi, R. und A. Zischg (2011): Brief Communication: „An inventory of permafrost evidence for the European Alps“. *The Cryosphere* 5, S. 651–657

Delaloye, R., Lambiel, C. und I. Gärtner-Roer (2010): Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps. *Geographica Helvetica* 65, S. 135–145

Gruber, S., Hoelzle, M. und W. Haeberli (2004): Rock-wall temperatures in the Alps: Modelling their topographic distribution and regional differences. *Permafrost and Periglacial Processes* 15, S. 299–307

Harris, C., Kern-Luetsch, M., Smith, F. und K. Isaksen (2008): Solifluction processes in an area of seasonal ground freezing, Dovrefjell, Norway. *Permafrost and Periglacial Processes* 19, S. 31–47

Huggel, C. (2009): Recent extreme slope failures in glacial environments: effects of thermal perturbation. *Quaternary Science Reviews* 28, S. 1119–1130

Kaufmann V. und A. Kellerer-Pirklbauer (2015): Active rock glaciers in a changing environment: Geomorphometric quantification and cartographic presentation of rock glacier surface change with examples from the Hohe Tauern Range, Austria: In: Kriz K. (Hrsg.): 16 years of the Commission on Mountain Cartography (CMC) of the International Association of Cartography (ICA), Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie 21, S. 179–190

Kellerer-Pirklbauer, A. (2018): Solifluction rates and environmental controls at local and regional scales in central Austria. *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography* 72, S. 37–56

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb, G. K., Avian, M. und J. Carrivick (2012): Climate change and rock fall events in high mountain areas: Numerous and extensive rock falls in 2007 at Mittlerer Burgstall, Central Austria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94, S. 59–78

Krautblatter, M., Funk, D. und F. K. Guenzel (2013): Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, S. 876–887

Magnin, F., Krautblatter, M., Deline, P., Ravanel, L., Malet, E. und A. Bevington (2015): Determination of warm, sensitive permafrost areas in near-vertical rockwalls and evaluation of distributed models by electrical resistivity tomography. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface* 120, S. 745–762

NRC-Permafrost-Subcommittee (1988): Glossary of Permafrost and related ground-ice terms. NRC Technical Memorandum 142, S. 1–156

Paul, F., Frey, H. und R. Le Bris (2011): A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results, *Annals of Glaciology* 52, S. 144–152

PERMOS (2016): Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014. Technical report of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences

Phillips, M. und J. Schweizer (2007): Effect of mountain permafrost on snowpack stability. *Cold Regions Science and Technology* 47, S. 43–49

Pudasaini, S. P. und M. Krautblatter (2014): A two-phase mechanical model for rock-ice avalanches. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface* 119, S. 2272–2290

Ravanel, L. und P. Deline (2011): Climate influence on rock-falls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age'. *Holocene* 21, S. 357–365

Ravanel, L., Allignol, F., Deline, P., Gruber, S. und M. Ravello (2010): Rock falls in the Mont Blanc Massif in 2007 and 2008. *Landslides* 7, S. 493–501

Roer, I., Kaab, A. und R. Dikau (2005): Rockglacier kinematics derived from small-scale aerial photography and digital airborne pushbroom imagery. *Zeitschrift für Geomorphologie* 49, S. 73–87

Roer, I., Haeberli, W., Avian, M., Kaufmann, V., Delaloye, R., Lambiel, C. und A. Kääb (2008): Observations and considerations on destabilizing active rockglaciers in the European Alps. In: Kane, D. L. und K. M. Hinkel (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*, June 29–July 3, 2008, Fairbanks, Alaska 2, S. 1505–1510

Wahrhaftig, C. und A. Cox (1959): Rock Glaciers in the Alaska Range, *GSA Bulletin* 70 (4), S. 383–436

AUTOREN

Prof. Dr. Michael Krautblatter, geb. 1977
Technische Universität München
m.krautblatter@tum.de
Schwerpunkte: Alpine Naturgefahren, Hangbewegungen und Sedimentdynamik, alpine und arktische Permafrostsysteme, Alpen, Kanadische Arktis, Ecuador

Dr. Andreas Kellerer-Pirklbauer, geb. 1973
Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, Österreich
andreas.kellerer@uni-graz.at
Schwerpunkte: Physiogeographische Gebirgsforschung (Fokus glaziale und periglaziale Prozesse und Formen), Ostalpen, Island

Dr. Isabelle Gärtner-Roer, geb. 1975
Geographisches Institut, Universität Zürich, Schweiz
isabelle.roer@geo.uzh.ch
Schwerpunkte: Gletscher und Permafrost im Wandel, Alpen, Subarktis

Summary

Permafrost in the Alps. Features, geographic spread, and future development

Michael Krautblatter, Andreas Kellerer-Pirklbauer, Isabelle Gärtner-Roer

The distribution of permafrost in the Alps significantly affects the thermal, hydrological, mechanical and biotic behaviour of frozen rock walls, debris and nearby soils. While permafrost itself is a “hidden glaciation” inside rock and debris masses, geomorphological and climatological features like rock glaciers, solifluction lobes, permanently ice-filled fractures in rock masses and local cold air circulation phenomena demonstrate the effects of alpine permafrost. The area covered by permafrost in the European Alps, mostly above 2,500 m approximates 6,200 km² and is roughly 3 times larger than the area covered by Alpine Glaciers (c. 2,000 km²). Thus, water storage around permafrost occurrences becomes increasingly important as summer water supply due to rapidly shrinking glacier volumes. Coincident to the climatic warming trend since 1980s, monitoring data from alpine permafrost boreholes and geophysical monitoring provide increasing evidence of shrinking permafrost area and warming permafrost temperatures. The change in permafrost conditions causes natural hazards including increasing rock fall activity and rock slope deformation, accelerating rock glaciers and increasing debris flow activity, often affecting high-mountain infrastructure and safety. Enhanced geomorphological process understanding, monitoring methods and modelling strategies are currently being developed to better anticipate the effects of permafrost degradation in alpine geosystems.